

A. M. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
СО СМЕЩЕНИЕМ ИСХОДНОГО ЦЕНТРА
ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ СТАТИЧНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

artkoshman@gmail.com, alexanderbs00@mail.ru, alex-leonard@yandex.ru, au@vstu.ru

В статье рассматривается подход по планированию движения мобильного робота со смещением центра потенциального поля статического препятствия, позволяющий исключить возможность возникновения колебаний центра масс мобильного робота.

Ключевые слова: мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, метод потенциальных полей, оптимальное управление мобильным роботом, компьютерное моделирование.

A. M. Koshman, A. S. Bykov, A. V. Leonard, V. A. Shurygin

**MOTION PLANNING OF A MOBILE ROBOT WITH A DISPLACEMENT
OF AN INITIAL CENTER OF THE POTENTIAL FIELD OF A STATIC OBSTACLE**

Volgograd State Technical University

The article considers an approach to planning the movement of a mobile robot with a displacement of the center of the potential field of a static obstacle, which eliminates the possibility of fluctuations of a mobile robot.

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, artificial potential field method, optimal robot control, computer simulation.

Введение

Для планирования движения мобильных роботов применяются различные методы локального и глобального планирования, отличающиеся своей эффективностью [1, 2]. При реализации алгоритма планирования движения робота (основанного на подходе, предложенном в статьях [3, 4]) могут возникать колебания центра масс робота, негативно влияющие на достижение роботом целевой точки за отведенное время. Колебания центра масс мобильного робота происходят, когда вектор скорости центра масс робота, центр препятствия и целевая точка лежат на одной прямой. С увеличением углового отклонения вектора скорости от указанной прямой вероятность возникновения ко-

лебаний уменьшается. Предлагаемый подход позволяет исключить возникновение колебаний робота вблизи препятствия, что расширяет область применения указанного метода [3].

Постановка задачи

Необходимо получить условия и алгоритм смещения исходного центра потенциального поля статического препятствия для его обхода роботом в 2D-пространстве. Движение мобильного робота происходит из начальной точки G в конечную точку F , в которую необходимо попасть за отведенное время τ с начальными и конечными условиями: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$ и $x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ (рис. 1).

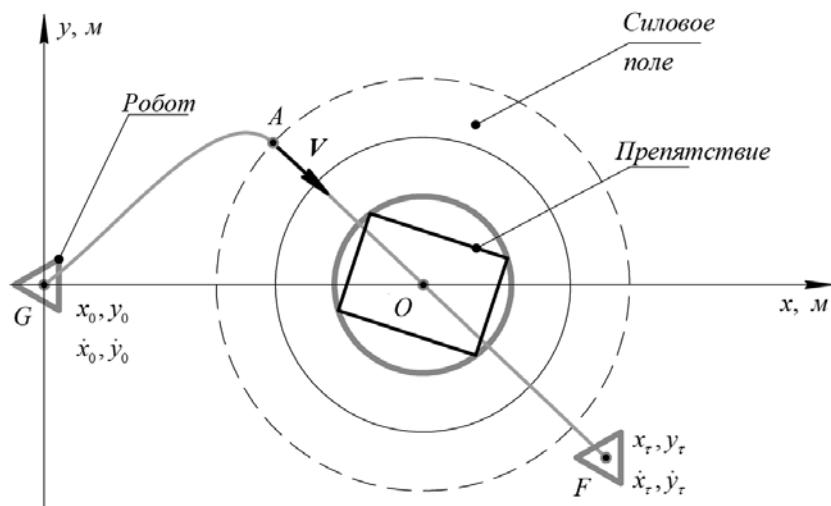


Рис. 1. Постановка задачи

Вектор скорости центра масс робота V , центр статического препятствия (т. O) и целевая точка (т. F) лежат на одной прямой (AF).

При этом полагается, что робот способен реализовать любую траекторию движения его центра масс как угодно быстро (робот обладает идеальной маневренностью).

Сканирующее устройство получает и обрабатывает информацию о препятствиях мгновенно и в полном объеме (на заданном удалении).

Теоретическое обоснование смещения поля

В процессе движения мобильного робота в зоне действия потенциального поля r_0 на него воздействует виртуальная пружина с жесткостью s (рис. 2). Данное воздействие позволяет роботу (радиусом R) избежать столкновения с препятствием (радиусом R_0), при соответствующем выборе параметра поля s (жесткости виртуальной пружины) на основе условия безударного обхода [3]. Направление силы F действия виртуальной пружины противоположно радиальной составляющей $V_{||}$ вектора скорости V робота.

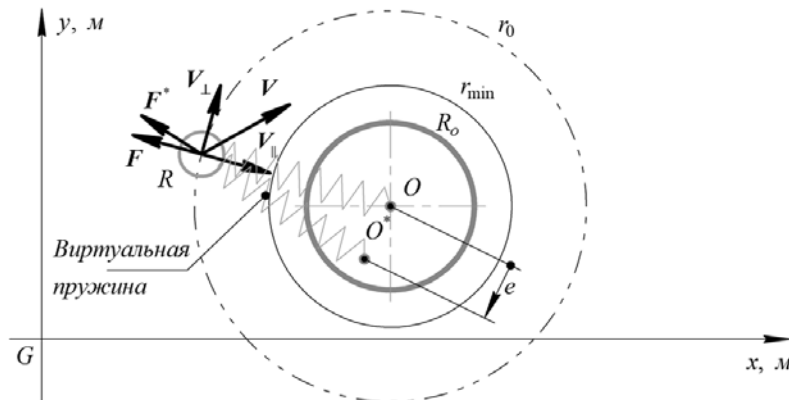


Рис. 2. Воздействие виртуальной пружины на робот

Смещение центра поля на расстояние e позволяет изменить направление отталкивающей силы (F^*), что оказывает влияние на траекторию движения центра масс робота. Чем больше смещение e , тем больше будет отклонение центра масс робота от прямой (AF , рис. 1), вдоль которой происходили колебания робота.

Пример алгоритма смещения поля

Алгоритм смещения центра поля препятствия состоит из пяти этапов: 1-й – проверка пересечения аналитической траектории робота опасной зоны ($r_{\min}$, рис. 2) вокруг препятствия для последующего определения направления смещения; 2-й – определение направления смещения центра поля; 3-й – расчет значения максимального смещения $e_{\max}$ центра поля; 4-й – расчет коэффициента смещения k_d ; 5-й – определение фактического смещения e центра поля.

Этап «1». Аналогично алгоритму планирования движения, предложенному в статьях [3–5], при обнаружении роботом препятствия производится проверка пересечения аналитической траектории робота внутренней границы поля $r_{\min}$ (рис. 2). Данная проверка требуется как для

определения момента включения потенциального поля (исключающего столкновение робота с препятствием), так и для определения направления смещения центра потенциального поля (при его включении).

Этап «2». Смещение центра поля препятствия производится по направлению (hh , рис. 3), перпендикулярному вектору скорости V . Координаты (x_o^*, y_o^*) смещенного центра (т. O^*) поля вдоль осей x и y определяются из условий (1):

$$\begin{cases} x_o^* = x_o + e \cdot \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \\ y_o^* = y_o + e \cdot \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}, y > y_o \\ \begin{cases} x_o^* = x_o + e \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \\ y_o^* = y_o + e \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}, y \leq y_o \end{cases}, \quad (1)$$

где x, y – координаты центра масс робота в момент его пересечения границы $r_{\min}$ (при пробной попытке обхода препятствия); x_o, y_o – координаты центра исходного потенциального поля.

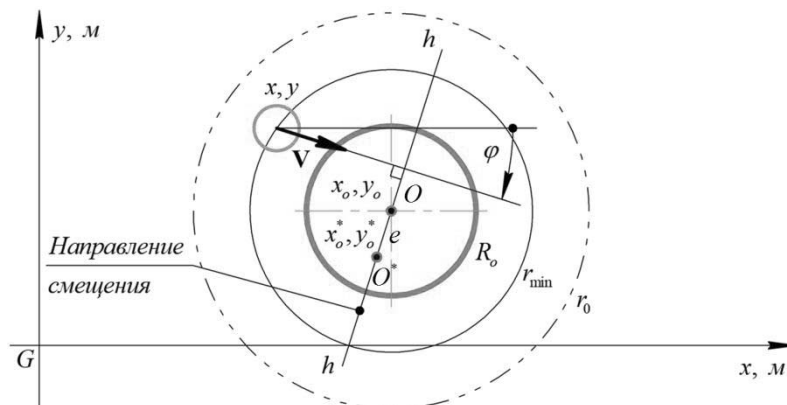


Рис. 3. Направление смещения центра поля препятствия

Этап «3». Максимально возможное смещение ограничено условием определения размеров границ потенциального поля $r_0 > r_{\min}$. Однако при уменьшении глубины поля ($r_0 - r_{\min}$) наблюдается рост параметра поля c , и как следствие – рост ускорений робота и потребных мощностей его привода [6]. Предлагается определять размеры r_0^* , $r_{\min}^*$ нового поля исходя из выражений (2):

$$\begin{cases} r_0^* = \sqrt{r_0^2 + e_{\max}^2}; \\ r_{\min}^* = r_{\min} + e_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где r_0^* – радиус внешней границы смещенного поля препятствия; $r_{\min}^*$ – радиус внутренней границы смещенного поля препятствия.

Приравнявая формулы (2) и добавляя корректирующий параметр поля Δr (задаваемый экспертно) в виде дополнительного слагаемого второй формулы (2), значение максимального смещения $e_{\max}$ можно определить из формулы (3):

$$e_{\max} = (r_0^2 - r_{\min}^2 - \Delta r^2 - 2 \cdot r_{\min} \cdot \Delta r) / [2(r_{\min} + \Delta r)]. \quad (3)$$

Этап «4». Расчет коэффициента смещения k_d производится для определения фактического смещения поля. Значение данного коэффициента принадлежит диапазону $[0 \dots 1]$. За коэффициент смещения поля принимается косинус угла γ между вектором скорости центра масс робота V и радиус-вектором $r_{\min}$, проведенным из центра масс робота к центру препятствия (рис. 4).

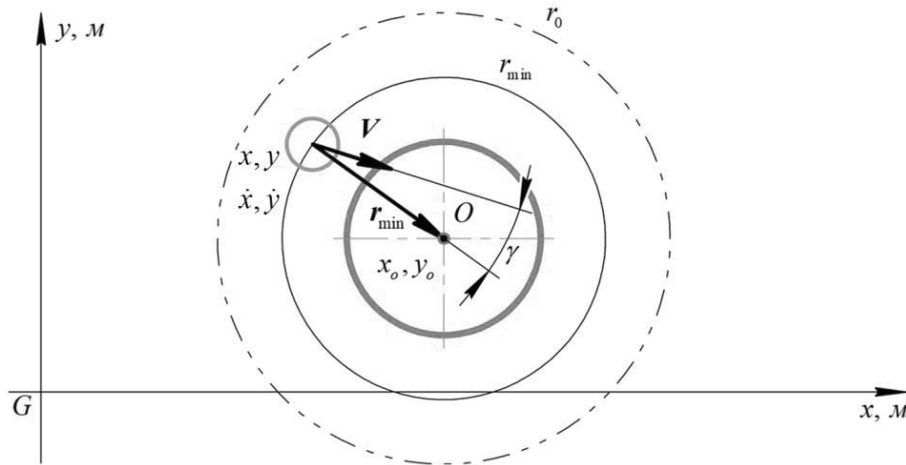


Рис. 4. Определение коэффициента смещения

Минимальное (0) и максимальное (1) значения данного коэффициента соответствуют ситуациям, когда робот движется по касательной к внутренней границе поля ($k_d = 0$, смещение не требуется), и когда робот движется к центру препятствия ($k_d = 1$, смещение должно быть максимальным $e = e_{\max}$). Расчет значения коэффициента смещения поля производится по формуле (4):

$$k_d = \cos \gamma = \frac{(V, r_{\min})}{|V| \cdot |r_{\min}|} = \frac{\dot{x} \cdot (x_o - x) + \dot{y} \cdot (y_o - y)}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \cdot \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - y)^2}}. \quad (4)$$

Этап «5». На заключительном этапе производится расчет фактического смещения центра поля с учетом коэффициента смещения k_d , определе-

ние координат центра (x_o^*, y_o^*) и параметров $(r_0^*, r_{\min}^*)$ смещенного потенциального поля (5):

$$\begin{cases} x_o^* = x_o + e_{\max} k_d \sin(\varphi) \\ y_o^* = y_o - e_{\max} k_d \cos(\varphi), & y > y_o \\ x_o^* = x_o - e_{\max} k_d \sin(\varphi) \\ y_o^* = y_o + e_{\max} k_d \cos(\varphi), & y \leq y_o \end{cases} \quad (5)$$

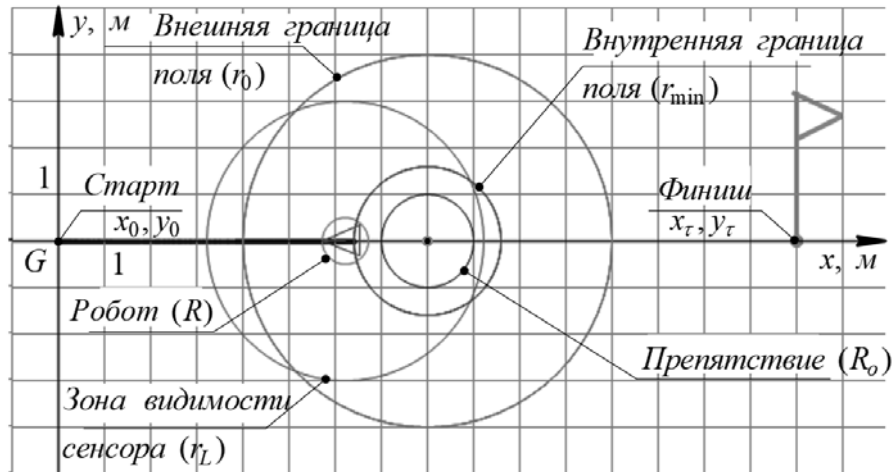
$$r_0^* = \sqrt{r_0^2 + (e_{\max} k_d)^2}, \quad r_{\min}^* = r_{\min} + e_{\max} k_d.$$

Компьютерное моделирование

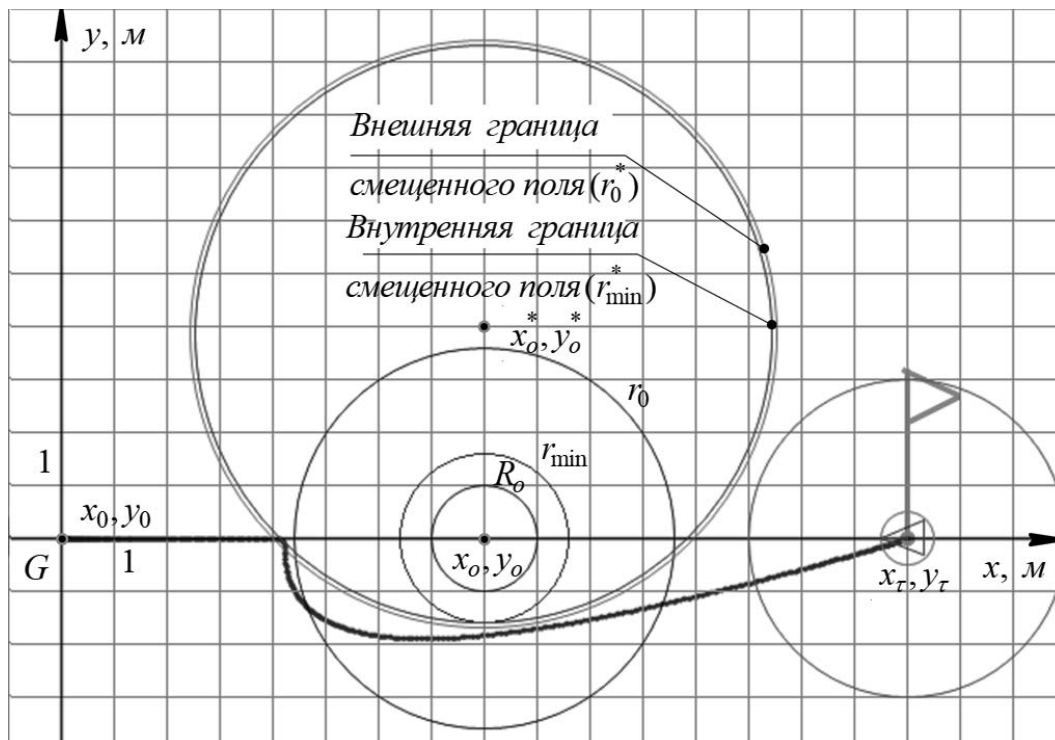
Для проверки работоспособности предлагаемого подхода был модифицирован ранее разработанный программный инструмент моделирования движения мобильного робота в 2D-пространстве [5]. Для серии численных экс-

периментов (рис. 5, 6) были приняты постоянными следующие параметры: параметры робота ($R=0,5$ м; $m=1$ кг; $r_L=3$ м; $k_a=1$ кг·с²; $k_\varepsilon=1$ кг·м²) и параметры времени ($t_0=0$ с;

$\tau=5$ с; $dt=0,01$ с). В численных экспериментах сравнивались результаты обхода статического препятствия на основе алгоритма без смещения исходного поля и со смещением.

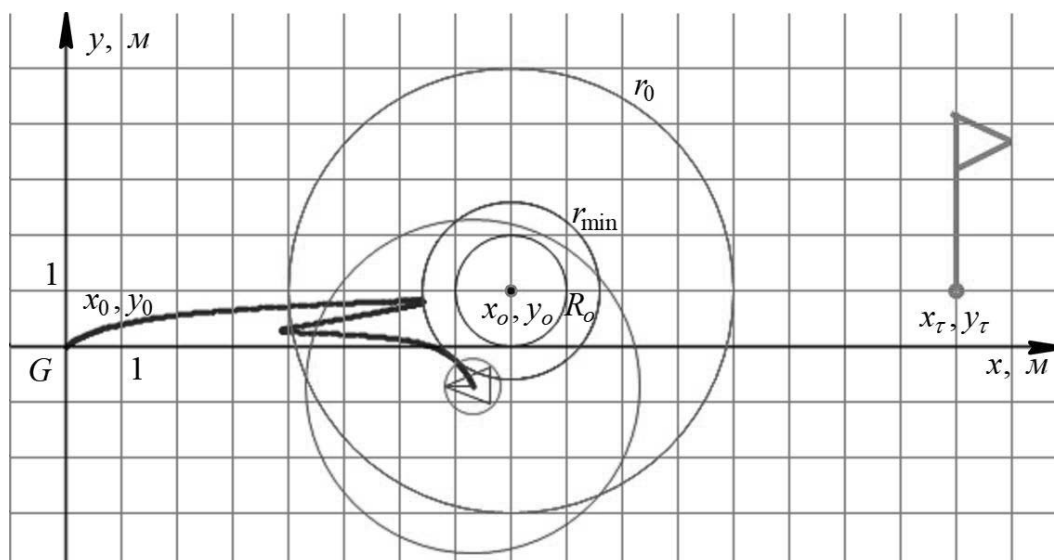


а) движение без смещения поля

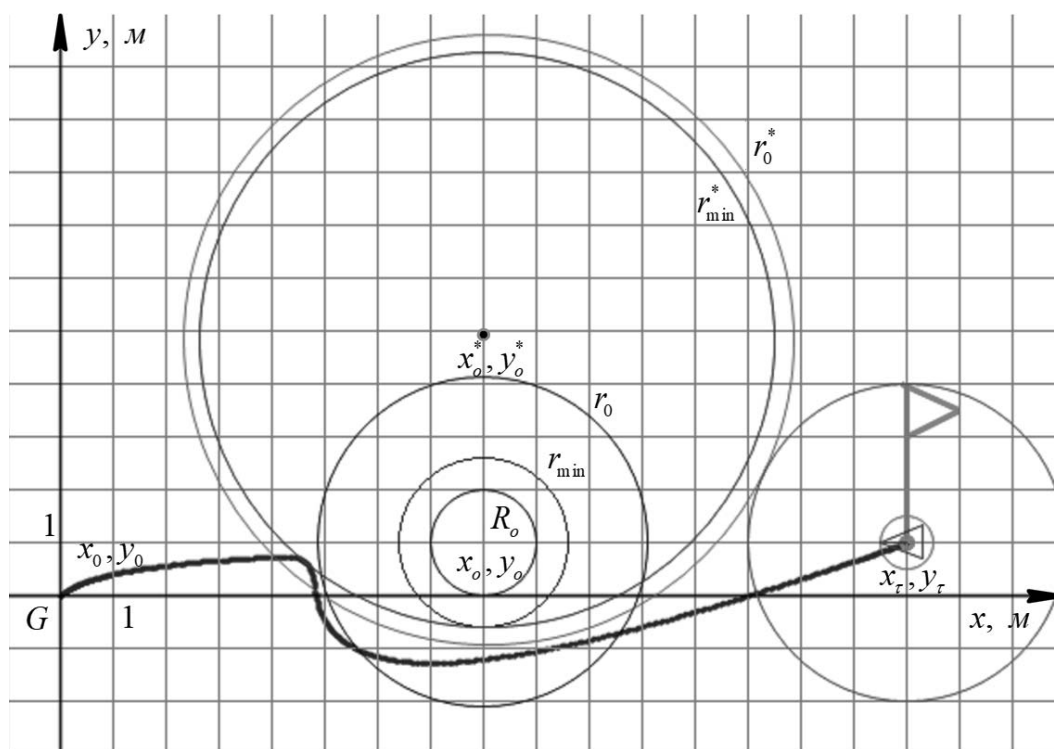


б) движение со смещенным полем

Рис. 5. Движение робота при нулевых начальных и конечных линейных скоростях, $y_0 = y_\tau = y_o = 0$



а) движение без смещения поля



б) движение со смещенным полем

Рис. 6. Движение робота при ненулевых начальных и конечных линейных скоростях
 $y_0 = 0$; $y_\tau = y_n = 1$ м

Заключение

Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что при экстремальных условиях движения робота (когда вектор скорости центра масс робота, центр препятствия и целевая точка лежат на одной прямой или близко к ней) предлагаемый подход планирования движения робота со смещением поля по-

зволяет обеспечить обход одного статичного препятствия за отведенное время без колебаний центра масс робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chunxi Cheng, Path planning and obstacle avoidance for AUV : A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.

2. Казаков, К. А. Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // Труды ИСП РАН. – 2016. – Т. 28, вып. 4. – С. 241–294.

3. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_t^I$). Ч. 1. Теория // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 34–42.

4. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_t^I$). Ч. II. Результаты /

А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48.

5. Кошман, А. М. Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом одного статичного препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 51–57.

6. Леонард, А. В. Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода $VC/APF+BC_t^I$ / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (280) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 32–40.